第5章
オシロスコープによる波形観測テクニック

ディジタル信号の正体を見る

依田達夫

ディジタル信号は‘0’と‘1’で表現されるが，実際の信号は，きれいな矩形波ではない．高速回路設計や実機検証では，ディジタル波形の特徴をよく理解しておく必要がある．ここでは，オシロスコープによる実際の波形を見ながら，ディジタル回路で起こるアナログ的挙動を解説する．また，実機による検証で求められる信号の観測テクニックを紹介する．（編集部）

新人のエンジニアの方は，オシロスコープを使って回路の評価を行う機会が多いと思います．オシロスコープは，時間とともに変化する電圧を，目で容易に確認できる装置です．さまざまな計測器が存在する中で，オシロスコープは基本中の基本と言えます．

しかし，基本的な計測器だからこそ落とし穴があります．例えば，表示される波形を鵜呑みにしてはいけません，オシロスコープは万能ではないのです．オシロスコープもハードウェアなので，不適切な使い方により波形をひずめたり，ノイズなどを追加してしまう場合があります．

「オシロスコープを変えただけで，pass/failの結果が変わってしまった」とか「使用するオシロスコープによって立ち上がり時間が異なり，どれを信じてよいか分からず困っている（**図1**）」という話をよく耳にします．これでは，開発やデバッグの効率が悪いと言わざるを得ません．

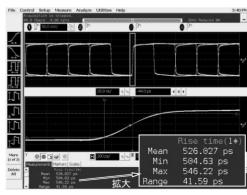
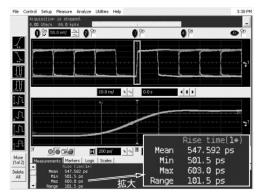
本章では，オシロスコープ（観測用のプローブを含む）によって波形が変わる様子を写真を使って示しながら，ディジタル信号の特性を解説します．また，評価する信号に適した測定器を選ぶことの重要性や，選定時のポイントを紹介します．

1 ディジタル信号とその評価手法

ディジタル信号の波形は，単純な‘0’，‘1’ではありません．

（**a**）測定結果1

（**b**）測定結果2

図1 どちらの波形が正しいか分からない
同じ信号を観測しているのに，使用するオシロスコープによって観測結果が異なる．(a)と(b)では立ち上がり時間が異なっていることがわかる．

KeyWord オシロスコープ，オーバシュート，リンギング，反射，ジッタ，ノイズ，アイ・パターン，ノイズ・フロア，帯域，スペクトラム・アナライザ，高調波，立ち上がり時間，プローブ，アクセサリ，アクティブ・プローブ，パッシブ・プローブ

● **ディジタル信号は矩形波ではない**

実際の波形は，有限の立ち上がり時間と立ち下がり時間を持ちます．また，オーバシュートやリンギングが存在するアナログの波形です（**図2**）．

ディジタル伝送では，データの‘0’，‘1’が期待通りにエラーなく伝わることが重要になります．信号はしきい値電圧（スレッショルド・レベル）より低い場合は‘0’，高い場合は‘1’と判定します．正しく‘0’，‘1’判定ができない場合に，回路全体は動作異常を起こします．

● **立ち上がり時間の評価**

ディジタル信号の測定において非常に重要な測定項目の一つが，立ち上がり時間です．

データの‘0’，‘1’の判定を狂わせる原因は，主に信号の遷移の部分にあります．‘0’から‘1’，‘1’から‘0’に変化する個所が最も危険なので，これらエッジを捉えるところから，信号の評価はスタートします．

立ち上がり時間や立ち下がり時間を精度良く測定することは，信号の振る舞いを正しく観測する上で欠かせません．

● **アイ・パターン評価**

信号が高速化すると，伝送線路のさまざまな影響を受けて信号品質が劣化します．伝送路の帯域が足りないと波形はなまります．インピーダンスの不整合による反射，またジッタ，ノイズなども信号品質を劣化させます．すると，デバイスの‘0’，‘1’の判定が難しくなり，ビット．エラー（本来‘0’のところを‘1’と判定，またはその逆）を起こす可能性があります．そこで，アイ・パターンを使って波形を評価することが一般的です．

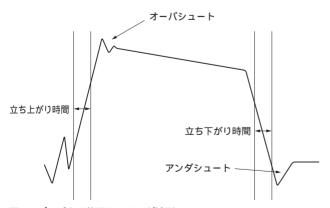



図2　ディジタル信号もアナログ波形
ディジタル信号の波形は，単純な‘0’，‘1’ではない．

アイ・パターンは，**図3**のように，波形をビットごとに重ね合わせたものです．**図4**のように，波形の重なり具合が「目」のような形状になることから，アイ・パターンと呼びます．ノイズやジッタ，帯域不足など信号に関する多くの情報を知ることができます．また，直感的に信号を評価できる便利な手法です．

アイが横方向および縦方向に十分開いていることが，ビット・エラーを起こさないための条件になります．信号の劣化が大きいとアイの開きが小さくなり，正しく信号を判定することが困難になります．

USB 2.0やPCI Expressなど，最近の高速シリアル・バス規格には，専用のマスクによるマスク試験を行います．マスクとは，信号の違反ゾーンのことで，規格で定められ

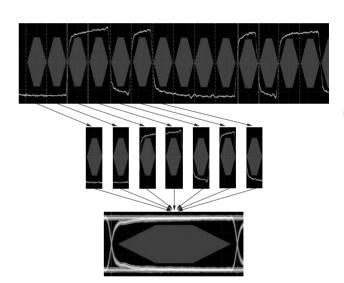



図3　アイ・パターンの作り方
波形をビットごとに重ね合わせたもの．

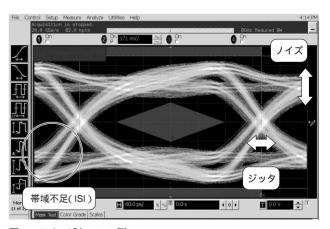



図4　アイ・パターンの例
ノイズやジッタ，帯域不足など信号に関する多くの情報を知ることができる．

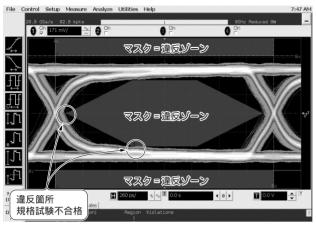



図5　マスク試験
マスクとは信号の違反ゾーンのことで，規格で定められた電圧方向と時間方向の限界範囲を表す．波形がマスクにかからなければ合格，かかってしまうと不合格になる．

た電圧方向と時間方向の限界範囲を表します．波形がマスクにかからなければ合格，かかってしまうと不合格になります(**図5**)．

2　精度の高い測定のために波形を知る

オシロスコープが波形をひずませて表示してしまう要因は，いくつも挙げられます．例えば，

- 帯域
- ノイズ・フロア
- A-D コンバータの線形性
- インターリーブ(複数のA-Dコンバータを使ってサンプリング速度を上げる技術)の精度
- トリガ・ジッタ

中でも最も分かりやすく，かつ影響の大きいのは「帯域」です．

● オシロスコープの帯域の定義

オシロスコープの仕様書やカタログに記載されている「周波数帯域幅」とは，何を指しているのでしょうか．

あらゆる電子コンポーネントと同じように，オシロスコープも周波数が上がるにつれて応答が悪くなっていきます．低い周波数のsin波であれば，オシロスコープはフラットな応答を示し，画面上で正しい振幅で表示されます．しかし，周波数が上がるにつれて応答が悪くなり，振幅は小さく表示されてしまいます．そのため，オシロスコープの

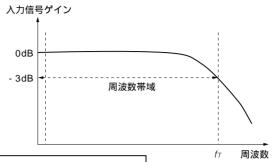



図6　オシロスコープの周波数特性
縦軸は，オシロスコープに入力されたsin波の振幅とオシロスコープの画面上で観測されるsin波の振幅の比．

性能を"周波数帯域"で定義しています．周波数帯域は周波数特性・周波数応答特性とよばれることもあり，一般に「そのオシロの帯域は？」といわれる場合は「オシロの周波数帯域幅」のことを指します．英語ではBandwidthと言い，省略してBWと表記されることもあります．

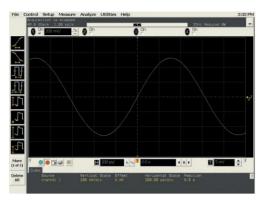
図6がオシロスコープの周波数特性のグラフです．縦軸は，オシロスコープに入力されたsin波の振幅と，オシロスコープの画面上で観測されるsin波の振幅の比をとって，dB(対数)で表示しています．横軸は周波数です．オシロスコープの周波数帯域幅は，「ある振幅(電圧)のsin波を入力したときに，3dB減衰する周波数」と定義されます．

2GHz帯域のオシロスコープを使ったsin波の観測例を**図7**に示します．周波数帯域幅が2GHzなので，1GHz，1Vのsin波を入力した場合は，オシロスコープは忠実に波形を表示します．ところが，周波数帯域いっぱいの2GHz，1Vのsin波を入力すると，オシロスコープの周波数特性により，画面上には3dB減衰した約700mVのsin波が表示されます．このオシロスコープに2GHz以上のsin波を入力しても，波形は減衰してしまって正しい測定はできません．3GHz，1Vのsin波信号を入力した場合は，ほとんど0mV(信号を補足できない)になってしまいます．

● オシロスコープの帯域と表示される波形の関係

信号の周波数成分について考えてみましょう．**図8(a)**のような理想的な繰り返しのディジタル・パルス信号を，スペクトラム・アナライザを使って周波数領域の測定をすると，**図8(b)**のようにいくつもの周波数成分が含まれていることが分かります．

理想的なパルス信号(方形波)をフーリエ変換すると，

（a） 1GHzのsin波

（b） 2GHzのsin波

（c） 3GHzのsin波

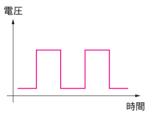
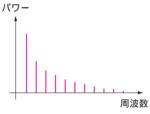
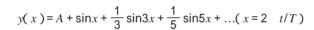
図7　2GHz帯域のオシロスコープを使ったsin波の観測例
1GHzのsin波を入力したときは，ほぼ忠実な波形を表示できる．2GHzのsin波では3dB減衰した波形になる．3GHzのsin波を入力すると，ほとんど信号を補足できない．

（a） 理想的なディジタル波形

（b） 周波数成分

図8　信号の周波数成分
理想的な繰り返しのディジタル・パルス信号には，いくつもの周波数成分が含まれている．

5

$$y(x)=A+\sin x+\frac{1}{3}\sin 3x+\frac{1}{5}\sin 5x+\cdots\ (x=2\pi t/T)$$

のように，基本周波数と奇数次の高調波成分に分解することができます．ここでxは基本周波数です．オフセット分＋基本周波数成分＋3倍高調波成分＋5倍高調波成分＋7倍高調波成分…と続きます．

基本周波数成分だけを含んだ場合は当然sin波ですが，3倍，5倍とより多くの奇数次高調波成分を含むほど，波形は矩形波に近づいていきます（**図9**）．矩形波でなくても，あらゆる波形が，その波形の持つ各周波数成分に分解できます．

オシロスコープの周波数特性はローパス・フィルタの特性になります．帯域より下の周波数成分は通すことができますが，帯域より高い周波数成分は通すことができません．測定する波形のスペクトラムに対して，十分な周波数帯域を持つオシロスコープの場合は，元の波形をほぼ忠実に再現できます．

帯域の狭いオシロスコープで測定すると，元の信号のエッジは崩れ，なまってしまいます．高い周波数成分がオシロスコープによってカットされてしまったのです（**図10**）．信号に含まれるアナログ周波数成分を十分カバーできる帯域幅のオシロスコープを選択する必要があります．

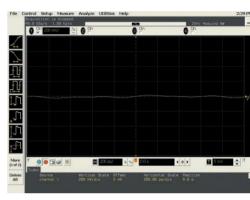
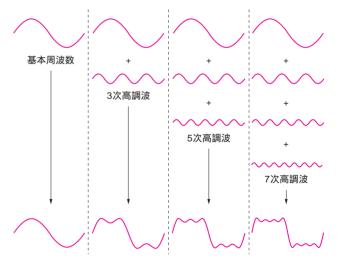



図9　基本波と奇数次高調波の合成
より多くの奇数次高調波成分を含むほど，波形は矩形波に近づいていく．

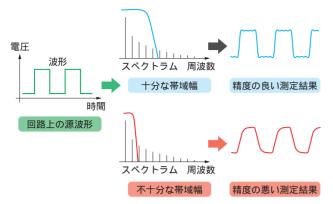



図10　オシロスコープの周波数特性はローパス・フィルタ

測定する波形のスペクトラムに対して十分な周波数帯域を持つオシロスコープの場合は，元の波形をほぼ忠実に再現できる．

図11　1.25GHzの矩形波の周波数成分

基本周波数の1.25GHzにピークがある．また，3倍高調波の3.75GHz，5倍高調波の6.25GHz，7倍高調波の8.75GHz，9倍高調波の11.25GHzにそれぞれピークが出ている．

● オシロスコープの帯域は5倍高調波まで必要か？

帯域が足りないとほんとうに波形はなまるのか，実際の波形をオシロスコープで測定した例を見てみましょう．

オシロスコープに2.5Gbps（1.25GHz）の矩形波を入力しています．オシロスコープのFFT機能を使って，この波形の周波数成分を調べたのが**図11**です．基本周波数の1.25GHzにピークがあります．また，3倍高調波の3.75GHz，5倍高調波の6.25GHz，7倍高調波の8.75GHz，9倍高調波の11.25GHzにそれぞれピークが出ています．激しく波形が変動している部分は，オシロスコープのノイズ・フロアです．オシロスコープによる振幅の測定限界にあたります．

周波数が上がるに従って，ノイズ・フロアも落ち込んでいます．これは，オシロスコープの周波数応答，つまり周波帯域の限界を示しています．

このようなスペクトラムを持つ矩形波を，周波数帯域の異なるオシロスコープで測定するとどうなるのでしょうか．2GHz帯域，4GHz帯域，6GHz帯域，10GHz帯域とそれぞれ周波数帯域の異なるオシロスコープで測定した結果を，**図12**に示します．

2GHz帯域のオシロスコープは，基本周波数しか補足できません．画面上はsin波が表示されます．

4GHzのオシロスコープは，基本周波数と3倍高調波の成分を補足できます．sin波に比べるとエッジが少し立っていることが分かります．

6GHz帯域のオシロスコープは，5倍高調波の成分まで補足できます．また10GHz帯域のオシロスコープは7倍高調波までの成分を補足できます．オシロスコープ上で表示される波形が，より方形波に近づいていくのが分かります．

この2.5Gbpsの信号の場合，6GHzと10GHzのオシロスコープで波形があまり変わらないように見えます．この信号では，7倍高調波の成分は元から少なく，取れても取れなくてもさほど影響がなかったためです．これが一般的に「5倍高調波までカバーする周波数帯域のオシロスコープで測定する必要がある」とか「帯域は5倍高調波までで十分」と言われている理由です．

● 本当に必要な帯域は立ち上がり時間から求まる

オシロスコープの必要な帯域は，測定する信号の基本周波数の5倍高調波（データ・レートの2.5倍）まであればよいと簡単に決まるのでしょうか．

同じデータ・レートの信号であれば，立ち上がり時間の急しゅんな信号とゆっくりな信号とでは必要なオシロスコープの帯域は変わるはずです．立ち上がりが速いほど，オシロスコープの帯域が必要になります．

（1）立ち上がりが速ければ5倍以上の帯域が必要

100MHzのクロック信号の立ち上がり時間を変えた場合，スペクトラムがどう変化するかをオシロスコープで確認します．

立ち上がり時間（t_R）が1.6ns，500ps，100psの三つの信号のスペクトラムを比較したのが**図13**です．立ち上がり時間の速い信号ほど，より広帯域のスペクトラムを持つことが分かります．立ち上がり時間が1.6nsの波形の場合，そのスペクトルは1.2GHzくらいまでの成分を持つことが分かります（それより高い周波数はオシロスコープのノイズ・

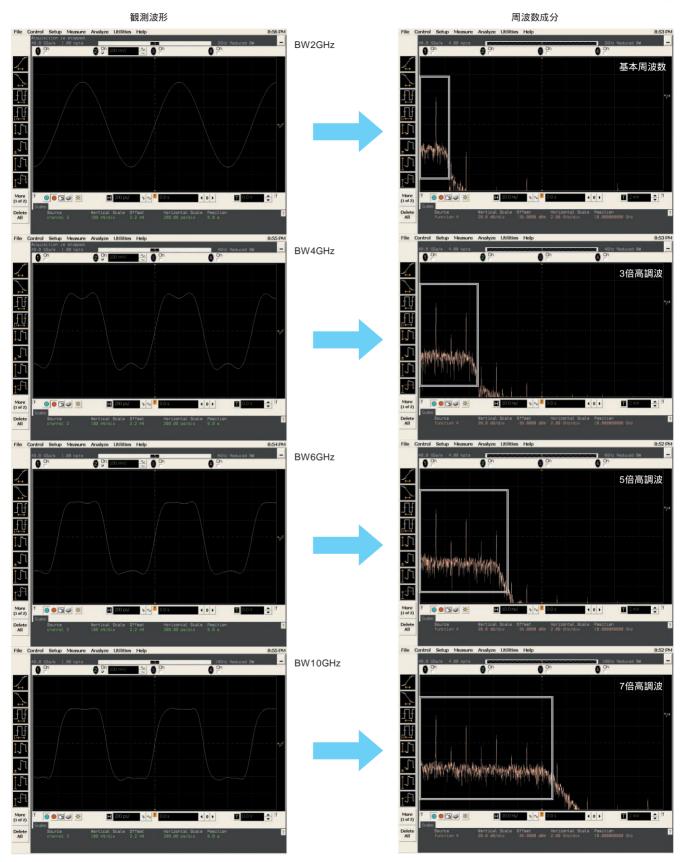



図12　1.25GHzの矩形波の観測結果
ほぼ正確な波形を得るためには，5倍高調波までカバーする周波数帯域のオシロスコープで測定する必要がある．

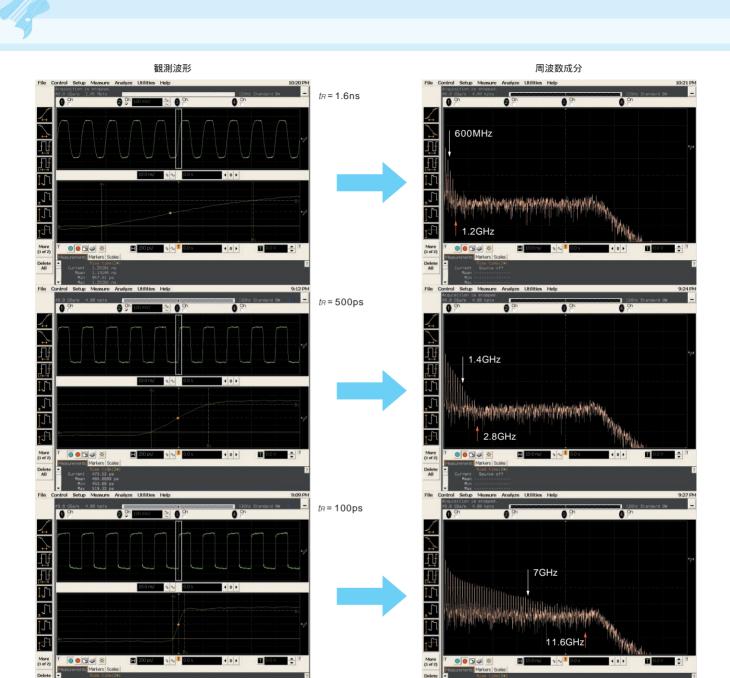



図13　100MHzのクロック信号と周波数成分
立ち上がり時間が1.6ns，500ps，100psの3種類を示す．立ち上がり時間の速い信号ほど，より広帯域のスペクトラムを持つ．

フロアに埋漏れている）．同様に立ち上がり時間が500psの波形のスペクトルは2.8GHzまで，立ち上がり時間が100psの波形のスペクトルは11.6GHzまで，オシロスコープで観測可能です．

別の言い方をすると，立ち上がりが急な波形ほど，高次の高調波のスペクトルのエネルギーが大きいことが分かります．精度の高い測定をするためには，その波形の持つエネルギーの大半をオシロスコープが捕らえることが必要です．

今回の例では，立ち上がり時間が1.6nsの場合は600MHz，500psの場合は1.4GHz，100psの場合は7GHzくらいの帯域のオシロスコープが適切と思われます（詳しくは後述）．

100MHzの5倍高調波は500MHzです． 立ち上がり時間が500ps，100psの場合，「5倍高調波まで捕らえられれば十分」というのは当てはまらないことが分かります．立ち上がり時間次第では，5倍よりも高い帯域のオシロスコー

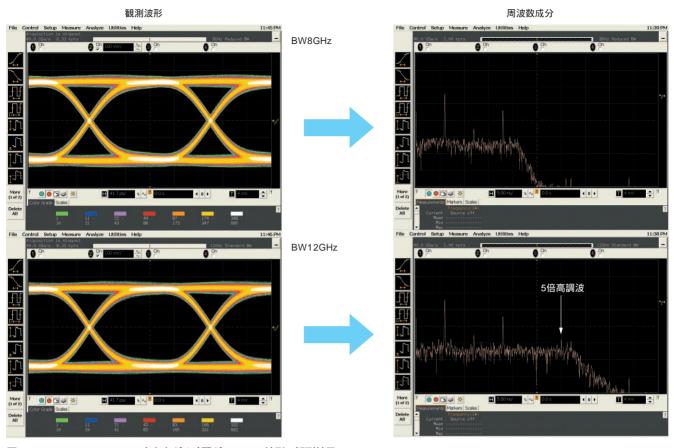



図14　4.8Gbps（2.4GHz），立ち上がり時間が100psの波形の観測結果
8GHz帯域と12GHz帯域の二つのオシロスコープで測定したアイ・パターンにほとんど差がない．5倍高調波のパワーが非常に小さければ，基本周波数の5倍の帯域を必要としない．

プが必要な場合もあります．

(2) 基本周波数の5倍の帯域を必要としない例

基本周波数の5倍の帯域を必要としない場合もあります．

データ・レート4.8Gbps（2.4GHz），立ち上がり時間が100psの波形を，8GHz帯域と12GHz帯域のオシロスコープで測定した例を**図14**に示します．この信号の基本周波数は2.4GHz，3倍高調波は7.2GHz，5倍高調波は12GHzです．8GHz帯域と12GHz帯域の二つのオシロスコープで測定したアイ・パターンに，ほとんど差がないことが分かります．この波形のスペクトラムを見ると，12GHzにある5倍高調波のパワーが非常に小さいのが確認できます．そのため，オシロスコープがこの5倍高調波を取れても，取れなくても，表示される波形に差はほとんどないのです．この例では，5倍高調波までの帯域がなくても，測定の精度に問題がない場合もあることが分かりました．

以上，二つの例から，精度の良い測定をするために“必要なオシロスコープの帯域はデータレートではなく，立ち上がり時間から計算する”ことが正しいと分かりました．

● 立ち上がり時間から必要な帯域を求める

立ち上がり時間t_Rの値からオシロスコープの必要な帯域は具体的にどう計算するのでしょうか．t_Rから信号に含まれる最大周波数成分の関係式を紹介します．

立ち上がりエッジを周波数成分に分解していくと，エネルギーはある周波数を境に十分に小さくなります．その境界をF_{max}と定義します．横軸に周波数，縦軸にエネルギーでプロットすると，F_{max}の周波数がちょうど人間の膝のような形になることから，Knee Frequencyとも呼ばれます．

図15において，F_{max}は，立ち上がり時間（10％～90％）では，$0.5/t_R$，立ち上がり時間（20％～80％）では$0.4/t_R$になります[(1)]．

F_{max}から必要な帯域が求まりますが，オシロスコープの周波数特性がガウス（Gauss）応答かフラット（flat）応答かによって算出方法が異なります．精度の良い測定（測定誤

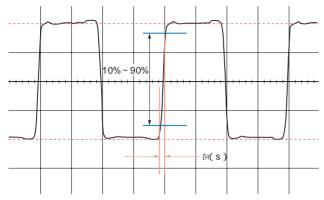



図15　F_{max}計算のパラメータ

立ち上がり時間（10％～90％）では0.5/t_R，立ち上がり時間（20％～80％）では0.4/t_Rになる．

表1　オシロスコープ帯域幅と測定確度

信号の最大周波数成分（F_{max}）	0.5/立ち上がり時間（10％～90％） 0.4/立ち上がり時間（20％～80％）	
オシロスコープの帯域特性	ガウス応答	フラット応答
立ち上がり時間　測定誤差	オシロスコープ帯域幅	
20％	1.0 F_{max}	1.0 F_{max}
10％	1.3 F_{max}	1.2 F_{max}
3％	1.9 F_{max}	1.4 F_{max}

差3％以内）を行うなら，一般にガウス応答ならF_{max}の1.9倍，フラット応答なら1.4倍の帯域が必要です．

例えば，t_R＝500ps（10％～90％）の波形測定に必要なオシロスコープの帯域幅は，

$$F_{max} = 0.5 / 150 \text{ [ps]}$$
$$= 3.3 \times 10^9 \text{ [Hz]} = 3.3 \text{ [GHz]}$$

ガウス型のオシロスコープなら，3.3［GHz］×1.9＝6.3［GHz］，フラット型オシロスコープなら3.3［GHz］×1.4＝4.6［GHz］の帯域が必要になります（**表1**）．

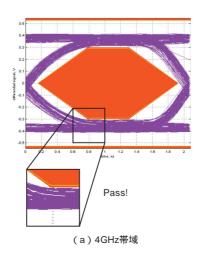
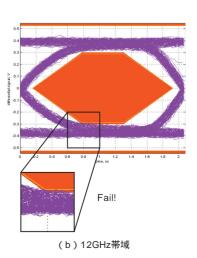
● オシロスコープの帯域とノイズのトレードオフ

波形の立ち上がり時間から，測定に必要なオシロスコープの最低限の帯域の計算方法が分かりました．今度はその逆を考えます．帯域は必要以上にあっても，測定に問題はないのでしょうか．

実は大いに問題があります．帯域が必要以上にあると波形に余分なノイズ成分が付加されて，場合によっては規格試験のpass/failを左右することもあります．「オシロスコープを変えたら，今までpassしていたものがfailになった」などの問題の大きな要因の一つが，オシロスコープの必要以上に高い帯域です．

具体例として，USB 2.0 Hi-Speedの信号品質テストを挙げます．同じUSBデバイスの波形を4GHz帯域と12GHz帯域の2種類のオシロスコープで測定した結果を，**図16**に示します．

4GHz帯域のオシロスコープではpassですが，12GHz帯域のオシロスコープではfailという結果になってしまいました．12GHz帯域のオシロスコープで観測した波形の方がノイズが多いことが分かります．そのために信号が赤いマスクの部分に侵入してしまい，failになりました．

この二つの波形のFFTの画面を見ると，問題は明らかです．**図17**のように，4GHz帯域のオシロスコープはUSBの波形を過不足なく捕らえています．それに比べて12GHz帯域のオシロスコープは，4GHz付近からUSBの波形がオ

（a）4GHz帯域

（b）12GHz帯域

図16　USB信号の観測

4GHz帯域のオシロスコープではPassだが，12GHz帯域のオシロスコープではFailになった．

シロスコープのノイズ・フロアに埋漏れているにもかかわらず，広帯域に渡ってオシロスコープがノイズを拾ってしまっています．

この例のように，ちょうど合否の境目にある，マスクぎりぎりの波形の場合，必要以上の帯域によるノイズは致命傷になりかねません．「高帯域オシロスコープだから安心」という落とし穴に気を付けてください．帯域はありすぎても害の場合があるのです．

例えば，USB 2.0は4GHz帯域，PCI Express Gen1は6 GHz帯域，DDR2インターフェース（400MHz）は3GHz帯域のように，測定する波形に合った適切な帯域のオシロスコープを使用することが重要です．

帯域を変える機能を持ったオシロスコープも世の中にはあるので，さまざまなレートの信号を測定する方は，そういった機能を活用するのも一つの手です．

3 プローブはオシロスコープ以上に注意が必要

測定対象に直接触れるプローブは，容易に波形に影響を与えます．適切なプローブおよびそのアクセサリを使用することは，オシロスコープの選択以上に重要になります．

図18は，プローブ以外すべて同じ条件で，同じ波形を測定した例です．Aが適切なプローブを使用している場合で，忠実に回路上の波形を再現しています．B，C，Dの波形はAの波形から程遠く，これでは何を測っているのか分かりません．B，C，Dの波形がなぜこう見えるのかは，後で解説します．このような間違ったプローブやアクセサリを使用していては，測定の効率が悪いどころか，誤った判断を招く可能性があります．

● プローブの周波数特性

簡単なプローブの負荷モデルで考えてみましょう．図19において，左が測定対象，右がプローブです．プローブには抵抗とキャパシタンスが並列に入っています．測定対象と，プローブの接続部分（アクセサリ）の信号側およびグラウンド側にインダクタンスがあると考えます．

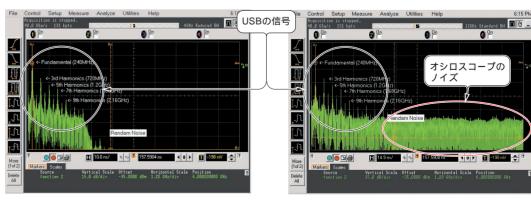
このように，プローブが測定対象に与える負荷として，抵抗性，容量性，誘導性の三つを考慮する必要があります．

このモデルによるプローブの周波数特性を，図20に示します．低い周波数では抵抗成分（R）が効き，入力インピーダンスは十分に高くなります．周波数が上がると容量性成分（C）が効いてきて，入力インピーダンスが下がります．さらに，高周波になると誘導性成分（L）が効いてきて，LとCの共振が起こります．共振周波数付近ではインピーダンスが著しく低下しているので，回路からプローブ側に電流が流れ込み，その結果リンギングが生じます．リンギングの対策として，プローブ先端にダンピング抵抗を入れ，共振周波数付近のインピーダンスを上げることで共振を防ぎます．

● 重要なのはアクセサリ先端部の帯域

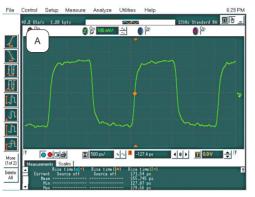
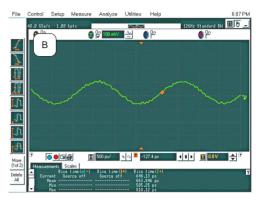
リード線など，プローブのアクセサリは誘導性成分（L）のかたまりなので，できるだけ短いものを使用します．アクセサリが長いほどLが増え，共振周波数が下がります．プローブの共振周波数が下がって来てオシロスコープの帯域内に入ってくると，波形の共振周波数成分が増幅され，リンギングが乗って見えます．

図18の四つの例を改めて見てみましょう．Bはプローブの帯域が足りず，振幅が小さくなっています．Cはアクセサリのリード線が長く，共振周波数がオシロスコープの帯

図17 USB信号の周波数成分
4GHz帯域のオシロスコープはUSBの波形を過不足なく捕らえている．12GHz帯域のオシロスコープは，広帯域に渡ってノイズを拾っている．

（a）4GHz帯域　（b）12GHz帯域

域内にまで下がったため，その周波数のリンギングが見えます．Dはプローブの先端にダンピング抵抗を入れていないため，全体的に大きく共振しています．

従来は，プローブ本体の帯域は仕様として明記されていましたが，付属のアクセサリの帯域については保証はされていませんでした（図21）．その結果，使用するアクセサリによっては，図18の例のC，Dのように思わぬ結果を招くことがありました．これでは，どのアクセサリを使ったらだいじょうぶなのか，悩んでしまいます．

近年はその点が見直され，アクティブ・プローブでは各アクセサリ使用時の先端での帯域が明記されているものが普及しています（図22）．

(a) 測定結果A

(b) 測定結果B

(c) 測定結果C

(d) 測定結果D

図18
プローブによる波形の変化
プローブ以外すべて同じ条件で同じ波形を測定した例．

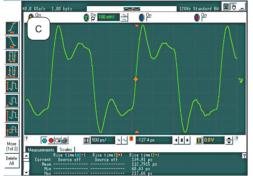
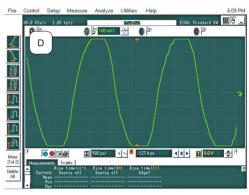
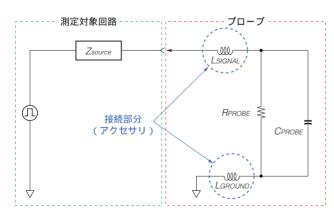



図19　プローブの負荷モデル

プローブには抵抗とキャパシタンスが並列に入っている．測定対象とプローブの接続部分（アクセサリ）の信号側・グラウンド側にインダクタンスがある．プローブが測定対象に与える負荷として，抵抗性，容量性，誘導性の三つを考慮する必要がある．

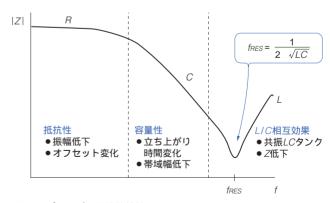



図20　プローブの周波数特性

低い周波数では抵抗成分（R）が効き，入力インピーダンスは十分に高くなる．周波数が上がると，容量性成分（C）が効いてきて入力インピーダンスが下がる．さらに高周波になると誘導性成分（L）が効いてきて，LとCの共振が起こる．

● パッシブ・プローブとアクティブ・プローブ

パッシブ・プローブとアクティブ・プローブの顕著な違いは入力容量です．前者の入力容量が10pFのオーダなのに対して，後者は0.1pFという非常に小さなものまで存在します．容量が小さいほどプローブの帯域は高くなりますので，アクティブ・プローブの方がはるかに優れた周波数性能を持ちます．

パッシブ・プローブが悪いという訳ではなく，オシロスコープの帯域の話と同じように，適したアプリケーションに使用すれば問題ありません．例えば，数十MHzの信号，電源周りやSPI，I^2Cのような低速なバスの場合は，パッシブ・プローブの方が操作性も簡単で適しています．DDRメモリやFPGA周りなど，クロックが100MHz～200MHzと高速な個所は，アクティブ・プローブの方が適しています．

1GHz帯域クラスのオシロスコープを使った測定の場合，パッシブ・プローブを組み合わせて使う場合が多いようです．しかし，今も述べたように数十MHzなら問題ありませんが，クロックが100MHzを超えてくると危険です．

100MHzクロックおよび200Mbpsのデータを，パッシブ・プローブとアクティブ・プローブで測定した結果を，**図23**に示します．使用したオシロスコープはどれも1GHz帯域です．もちろんアクティブ・プローブを使った方の波形が正確です．1GHz帯域クラスのオシロスコープだからと言って無条件にパッシブ・プローブを使うと，思わぬ落とし穴があるかもしれません．

100MHzのクロックでも，パッシブ・プローブとアクティブ・プローブでこれだけの差が出ます．それではもっと速い信号ではどうなるでしょうか．非常に普及が進んでいるDDR/DDR2メモリの波形を，パッシブ・プローブとアクティブ・プローブで観測した結果が**図24**です．測定対象はDDR2 400のDQ（データ）信号で，使用したオシロスコープはともに1GHz帯域です．両者が同じ波形とは考えにくいのですが，同じ波形です．アクティブ・プローブの方は十分アイが開いています．パッシブ・プローブの方

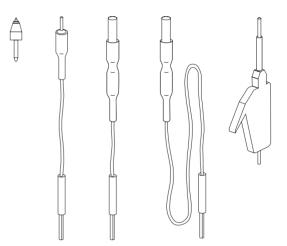
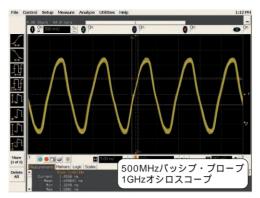
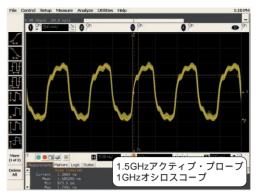



図21　さまざまなプローブ・アクセサリ
周波数帯域が保証されていないことがある．

12GHz，10GHz
5.2GHz
1.2GHz
Other Probe Head Configurations
See other side of card for recommended configurations.
See the manual for detailed information.
#4 Solder-in Differential
E2677A Solder-in differential probe head
01131-81510 91 W mini-axial lead resistors (2)
Probe either differential or single-ended signals
• 1169A: 12 GHz
• 1168A: 10 GHz
• Acceptable solder-in connection for differential and single-ended signals. N5381A is preferred.
• Higher capacitance than N5381A.
• Resistors must be cut to proper lengths (see manual).
#5 Socketed Differential
E2678A Socketed differential probe head
01131-81504 82 W axial lead resistors (2)
Probe either differential or single-ended signals
• 1169A: 12 GHz
• 1168A: 10 GHz
• Best socketed connection for differential and single-ended signals
• Slightly higher capacitance than #1
• Resistors must be cut to proper lengths (see manual).
#6 Differential Browser
01131-62102 91 W resistor probe tips (2)
E2675A Differential browser probe head
Tab adjusts distance between probe tips
• 1169A: 5.2 GHz
• 1168A: 5.2 GHz
• More general purpose browser than 5382A. for differential and single-ended signals
• Lower bandwidth and higher capacitance than N5382A.
#7 Solder-in Single-ended
E2679A Solder-in single-ended probe head
01131-81510 91 W mini-axial lead resistor (1)
01131-81504 0 W mini-axial lead resistor (1)
Ground
Signal
• 1169A: 5.2 GHz
• 1168A: 5.2 GHz
• Smallest probe head for single-ended signals
• Lowest capacitance single-ended probe head
• Resistors must be cut to proper lengths (see manual).
#8 Single-ended Browser
01130-60005 Ground collar assembly for single-ended browser
E2676A Single-ended browser probe head
01131-62102 91 W resistor probe tip
• 1169A: 6 GHz
• 1168A: 6 GHz
6GHz
• Smallest browser for single-ended signals
• Slightly higher capacitance than #4
• Excessive peaking (+ 6 dB) at ~9 Ghz; limit the bandwidth of input signal
#9 SMA Probe Head
E2695A SMA probe head
• 1169A: 8 GHz
• 1168A: 8 GHz
8GHz
• Preserves scope channels for measuring differential signals (vs. A-B).
• Inherent cable loss compensation.
• Common mode termination voltage can be applied.
• Offset SMA cables adapt to variable spacing
• Full bandwidth
Agilent Technologies
Printed in Malaysia
Part Number 01168-92003
01168-92003
#10 Damped Wire Accessories
E2678A Socketed differential probe head
01130-21302 160 W damped wire accessory (2)
• Properly damped wires preserve fidelity at reduced bandwidth for widely spaced differential and single-ended signals.
• 01131-85202 Solder-in socket allows connection to 25 mil square pins.
• 1169A: 1.2 GHz
• 1168A: 1.2 GHz
Probe either differential or single-ended signals

図22　アクティブ・プローブの帯域
アクセサリの帯域がカタログに明記されている．

（**a**）100MHzクロック

（**b**）200Mbpsのデータ

図23
プローブによる観測波形の変化

100MHzクロックおよび200Mbpsのデータをパッシブ・プローブとアクティブ・プローブで測定した結果である．使用したオシロスコープはどれも1GHz帯域．もちろんアクティブ・プローブを使った方の波形が正確なことが分かる．

（**a**）パッシブ・プローブ

（**b**）アクティブ・プローブ

図24
DDR2メモリの観測例

はISI（シンボル間干渉）が顕著に現れています．プローブの帯域が足りないため，波形の立ち上がりがなまります．そのため，‘０’から‘１’，または‘１’から‘０’にすぐに到達することができず，０１０１の１と，０１１の１のレベルが異なります．

参考・引用*文献

（1） Haward W. Johnson, Martin Graham, High-Speed Digital Design, A handbook of Black magic.

よだ・たつお
アジレント・テクノロジー（株）

<筆者プロフィール>

依田達夫．2000年，東京大学大学院を卒業．アジレント・テクノロジーに入社．オシロスコープやロジック・アナライザのアプリケーション・エンジニアとしてセールス活動やセミナ講師を担当している．趣味は大学から続けている競技スキー．「インターITスキー大会」というパソコン/電器/IT業界のスキー大会の運営もしている．参加者募集中！！